

Cartographie des zones de reproduction et de grégarisation du criquet pèlerin au Tchad

Mathias Kayalto^{1,2,3,*}, Mina Idrissi Hassani¹, Michel Lecoq^{3,4}, Pierre-Emmanuel Gay^{3,4} et Cyril Piou^{1,3,4}

¹ Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

² Agence nationale de lutte antiacridienne, Ministère de la Production de l'irrigation, N'Djamena, Tchad

³ CIRAD, UMR CBGP, 34398 Montpellier, France

⁴ CBGP, CIRAD, INRAE, IRD, Institut Agro, Université de Montpellier, Montpellier, France

Résumé – Le criquet pèlerin, *Schistocerca gregaria* Forskål, 1775, est un ravageur majeur pour l'agriculture. Affiner les connaissances sur sa distribution spatiale est essentiel pour sa gestion préventive. Dans ce but, nous avons utilisé au Tchad une technique de lissage spatial de densités sur 7014 observations du criquet pèlerin (1965–1971 et 1986–2017) afin d'élaborer des cartes saisonnières de répartition pour les périodes d'invasion et de rémission. Trois zones correspondant à des aires de reproduction et foyers de grégarisation ont été identifiées : (1) Kanem/lac Tchad, (2) Batha, (3) Ennedi. La première pourrait être un nouveau foyer de grégarisation. Ces zones se rajoutent à celle du massif du Tibesti, où les signalements sont plus rares que par le passé à cause de l'insécurité. Des prospections plus régulières devraient permettre de confirmer que la distribution du criquet pèlerin a récemment évolué.

Mots clés : *Schistocerca gregaria* / reproduction / prévention des risques / distribution spatiale / plasticité phénotypique

Abstract – Mapping of the breeding and gregarization areas of the desert locust in Chad. The desert locust, *Schistocerca gregaria* Forskål, 1775, is a major threat to agriculture. Refining our knowledge on its spatial distribution is a key point for its preventive management. To do so, we used in Chad a method of spatial smoothing of densities upon 7014 survey points (1965–1971 and 1986–2017) of the desert locust to develop seasonal distribution maps for invasion and remission periods. Three zones corresponding to breeding and gregarization areas have been identified: (1) Kanem/lake Chad, (2) Batha, (3) Ennedi. The first one may be a new gregarization area. These zones add to the Tibesti mountains where locust reports are less frequent than in the past, due to insecurity. More regular surveys should confirm that the distribution of the desert locust has recently changed.

Keywords: *Schistocerca gregaria* / reproduction / risk prevention / spatial distribution / phenotypic plasticity

1 Introduction

Le criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria* Forskål, 1775) constitue une menace pour la subsistance de plus de 65 pays d'Afrique, du Moyen-Orient et d'Asie du Sud-Ouest avec de sérieuses conséquences socio-économiques et environnementales (Steedman, 1988 ; Duranton et Lecoq, 1990 ; Latchininsky, 2010). Son aire d'invasion couvre 29 millions de kilomètres carrés, celle de rémission 16 millions de kilomètres carrés (Popov *et al.*, 1991 ; Latchininsky, 2010). Le coût de l'invasion de 2003–2005 est estimé à 400 millions de dollars

US (Brader *et al.*, 2006). Le criquet pèlerin exprime un polyphénisme comportemental dépendant de la densité de la population (Pener et Simpson, 2009 ; Sword *et al.*, 2010 ; Simpson *et al.*, 2011). En période de rémission, les populations solitaires sont dispersées en très faibles effectifs dans les zones désertiques. La grégarisation y débute à la faveur de séquences de pluies, favorables à la reproduction et à la multiplication des effectifs dans des végétations regroupées (Collett *et al.*, 1998 ; Cissé *et al.*, 2013). Elle continue à travers des phases de résurgence, de recrudescence et d'invasion au fur et à mesure que les populations et les superficies occupées augmentent (Duranton *et al.*, 1987 ; Lecoq, 1991). Pour contrer cela, une stratégie de lutte préventive a progressivement vu le jour (Magor *et al.*, 2008 ; Sword *et al.*, 2010) : on recommande

* Auteur de correspondance : kayaltomathias@gmail.com

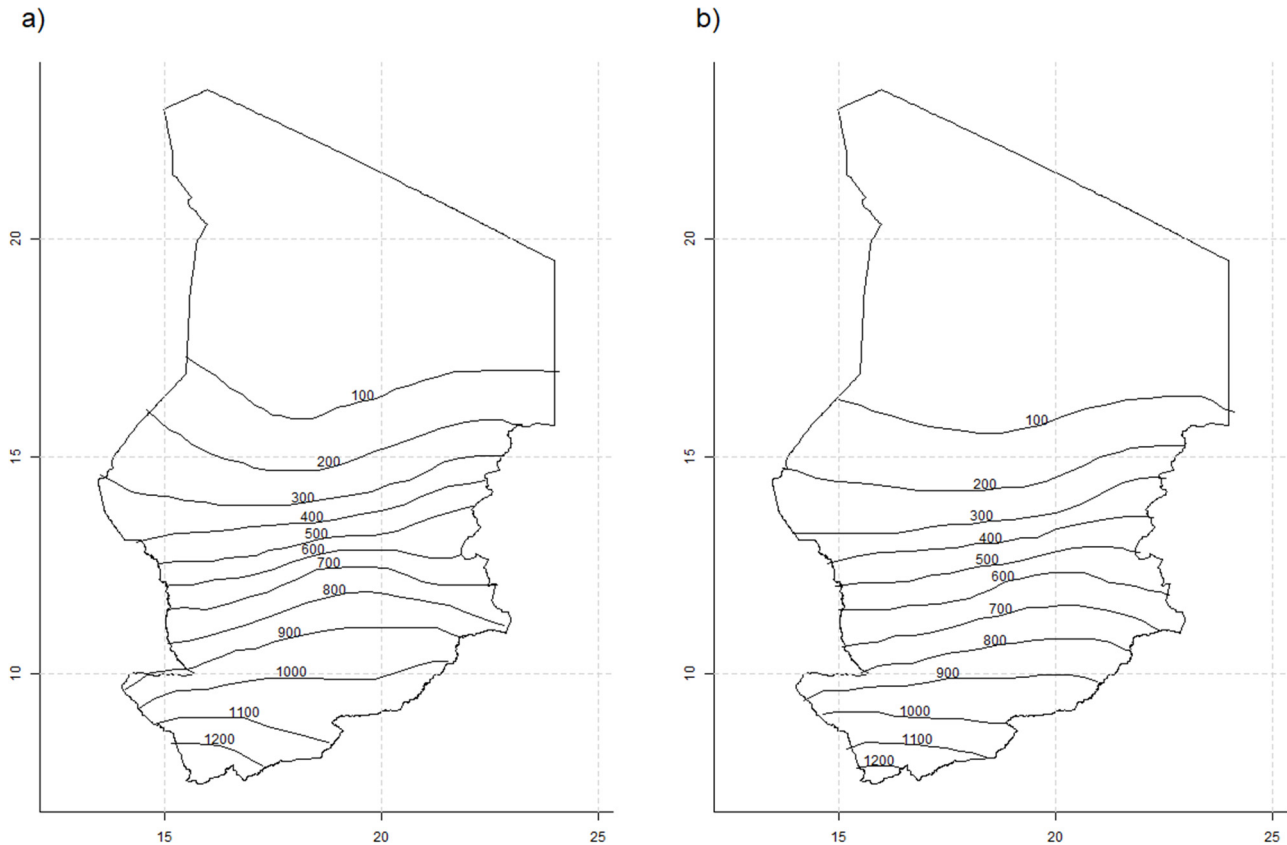


Fig. 1. Pluviométrie annuelle moyenne (mm) au Tchad sur les périodes (a) 1951–1980 et (b) 1971–2000 (Anonyme, 2012).
Fig. 1. Average annual rainfall (mm) in Chad over the periods (a) 1951–1980 and (b) 1971–2000 (Anonymous, 2012).

de surveiller en permanence les aires où des conditions écologiques favorables sont susceptibles d'initier la transformation du criquet pèlerin vers sa phase grégaire. Dans la région occidentale, on trouve de telles aires au Tchad, au Mali, au nord du Niger et en Mauritanie (Lecoq, 2004).

Le dispositif de prévention a été amélioré ces dernières années à l'aide de nouveaux outils (Cressman, 2008 ; Zhang *et al.*, 2019) comme la télédétection spatiale (Latchininsky *et al.*, 2016). Il est maintenant possible de collecter en temps réel des informations clés sur les conditions écologiques favorables à la reproduction, de les traiter très rapidement et d'envoyer les équipes de prospection dans les zones ayant une forte probabilité d'abriter des populations de criquets pèlerins (Piou *et al.*, 2017, 2019). Un premier atlas des zones de reproduction (Popov, 1997) a été publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Des travaux de cartographie des biotopes du criquet pèlerin ont été réalisés récemment en Algérie (Lazar *et al.*, 2016), au Maroc et en Mauritanie (Babah Ebbe, 2008 ; Piou *et al.*, 2017), au Mali (Keita, 2009), et au Niger (Dogo *et al.*, 2011). Ce travail restait à effectuer au Tchad, situé à un carrefour majeur d'échanges de populations acridiennes entre les régions occidentale (Niger, Mali et Mauritanie) et centrale (Soudan, Érythrée, Somalie et Éthiopie). Comme d'autres pays sahéliens, le Tchad a connu une réduction générale des précipitations depuis 1970 (Fig. 1). Dans la zone 15°N/15°E, elles sont passées d'environ 230 mm par an pendant la période 1951–1980, à 170 mm par an de 1971

à 2000. Une telle diminution a pu impacter certains sites de grégarisation, rendant en partie caducs les résultats des travaux réalisés entre 1926 et 1976, essentiellement sur la base de signalements en période d'invasion (Waloff, 1966 ; Popov, 1997 ; Lecoq, 2004).

L'objectif principal de cette étude est d'actualiser la carte des zones de reproduction et de grégarisation du criquet pèlerin au Tchad. Une évaluation générale des dynamiques annuelles en période de rémission et de recrudescence/invasion permettra de déterminer si, et comment, les zones à prospecter doivent être modifiées.

2 Matériels et méthodes

2.1 Données acridiennes

Nous avons utilisé les données collectées par l'Organisation commune de lutte antiacridienne et de lutte anti-aviaire (OCLALAV) de 1965 à 1971, par la Direction de la protection des végétaux et du conditionnement (DPVC) de 1986 à 2007, et enfin par l'Agence nationale de lutte antiacridienne du Tchad (ANLA) de 2007 à 2017. Le dispositif de surveillance et de lutte est initialisé au début de chaque campagne. Les observations de terrain (criquets, conditions météorologiques et habitat) sont enregistrées sur un terminal portable muni d'un logiciel de traitement de données puis intégrées dans un système d'information géographique (Cressman, 2001).

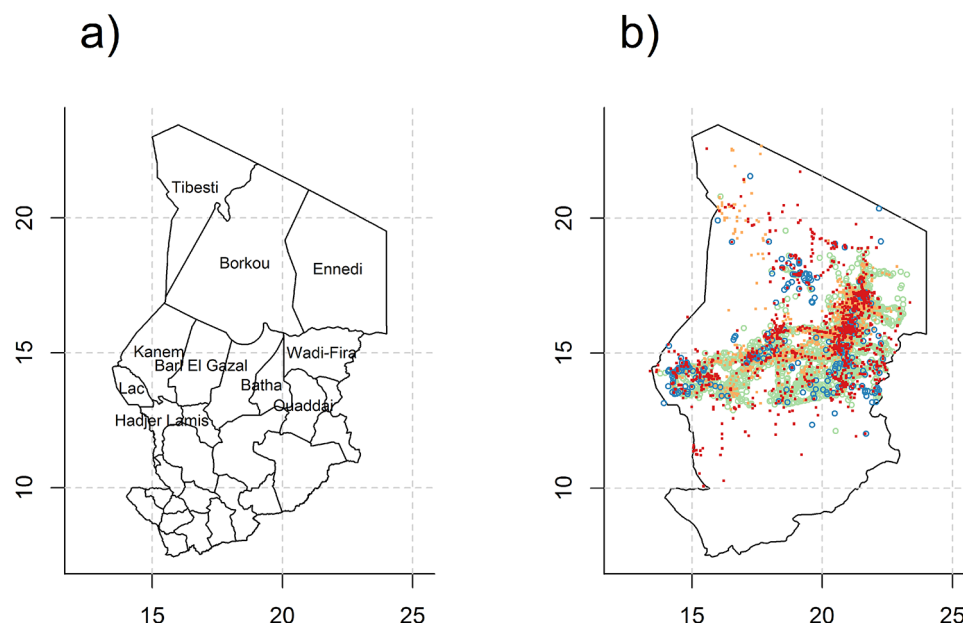


Fig. 2. a) Principales régions affectées par le criquet pèlerin. b) Résultats des points de prospections : cercles verts = absence de criquet pèlerin en période de rémission ; cercles bleus = présence en période de rémission ; carrés orange = absence en période d'invasion ; carrés rouges = présence en période d'invasion.

Fig. 2. a) Main areas affected by the desert locust. b) Results of surveys: green circles = absence of the desert locust in remission time; blue circles = presence in remission time; orange boxes = absence in invasion time; red boxes = presence in invasion time.

2.2 Conditionnement des données

Au total, 7014 points d'observations géo-référencés ont été utilisés (Fig. 2), dont 3284 points de présence, 1707 observations d'adultes solitaires, 382 de larves solitaires, 233 de taches larvaires, 114 de bandes et 231 d'essaims. Les années d'invasion/recrudescence sont caractérisées par le signalement d'essaims (8 ans). Les autres années sont considérées comme des années de rémission (23 ans). Ces distinctions permettent d'analyser séparément la dynamique de population des grégaires et celle des solitaires et des *transiens* (intermédiaires entre solitaires et grégaires). Pour identifier les zones de reproduction, nous avons utilisé trois types d'observations : la présence d'adultes s'accouplant, la présence d'adultes en ponte et la présence de larves jusqu'au troisième stade de leur développement (n'ayant pas eu le temps de s'éloigner trop de leur site de naissance). De même, pour les zones de grégation, trois critères ont été utilisés : la présence d'adultes solitaires regroupés, de larves *transiens*, et la densité d'adultes solitaires au-delà du seuil de grégation calculé pour chaque point en fonction de la végétation (couvert végétal, état de la végétation) selon les estimations de Cissé *et al.* (2013). Ainsi, le seuil utilisé pouvait aller de 208 adultes/ha avec une végétation peu dense et sèche à 1525 adultes/ha avec une végétation dense en pleine croissance (Cissé *et al.*, 2013). La cartographie des zones de grégation a aussi été réalisée en ne tenant compte que des deux premiers critères (adultes solitaires regroupés et larves *transiens*). Nous nous référerons à ces deux variantes ainsi : « avec 2 critères » ou « avec 3 critères ».

2.3 Analyse statistique

Nous avons analysé les points d'observation sur un pas mensuel en traitant les années d'invasion/recrudescence

séparément de celles de rémission. Une méthode de lissage spatial calculant la densité d'observations à l'aide d'un noyau gaussien isotrope d'écart-type σ avec des masses ponctuelles à chacun des points d'observation de présence (x_i) a été appliquée. La fonction de densité est estimée pour le pixel (u) de taille $0,05^\circ$ par :

$$\lambda(u) = \sum_i k(x_i - u),$$

où k est un filtre gaussien avec un écart-type σ de $0,5^\circ$.

Pour la distribution des observations de reproduction, nous avons également analysé séparément les données des années d'invasion/recrudescence et celles de rémission et appliqué le lissage spatial ci-dessus. Pour la distribution spatiale des habitats propices à la grégation, nous n'avons utilisé que les observations des années de rémission. Là aussi, le lissage spatial a été appliqué. Le logiciel libre R (R Development Core Team, 2008), avec les packages *cshapes* (Weidmann et Gleditsch, 2016) et *spatstat* (Baddeley *et al.*, 2016), nous a servi d'outil d'analyse.

3 Résultats

3.1 Cartographie des points de prospection

La répartition des points de prospection (Fig. 2b) montre des limites de distribution situées entre les latitudes 10 et 24°N . La plus forte concentration d'observations se situe entre 13 et 18°N , couvrant la zone de l'ouest, les piémonts des massifs de l'Ennedi à l'est et, plus faiblement, le Borkou et le Tibesti. À l'ouest, des criquets pèlerins sont présents dans les zones du lac Tchad, du Kanem et du Bahr El-Ghazal.

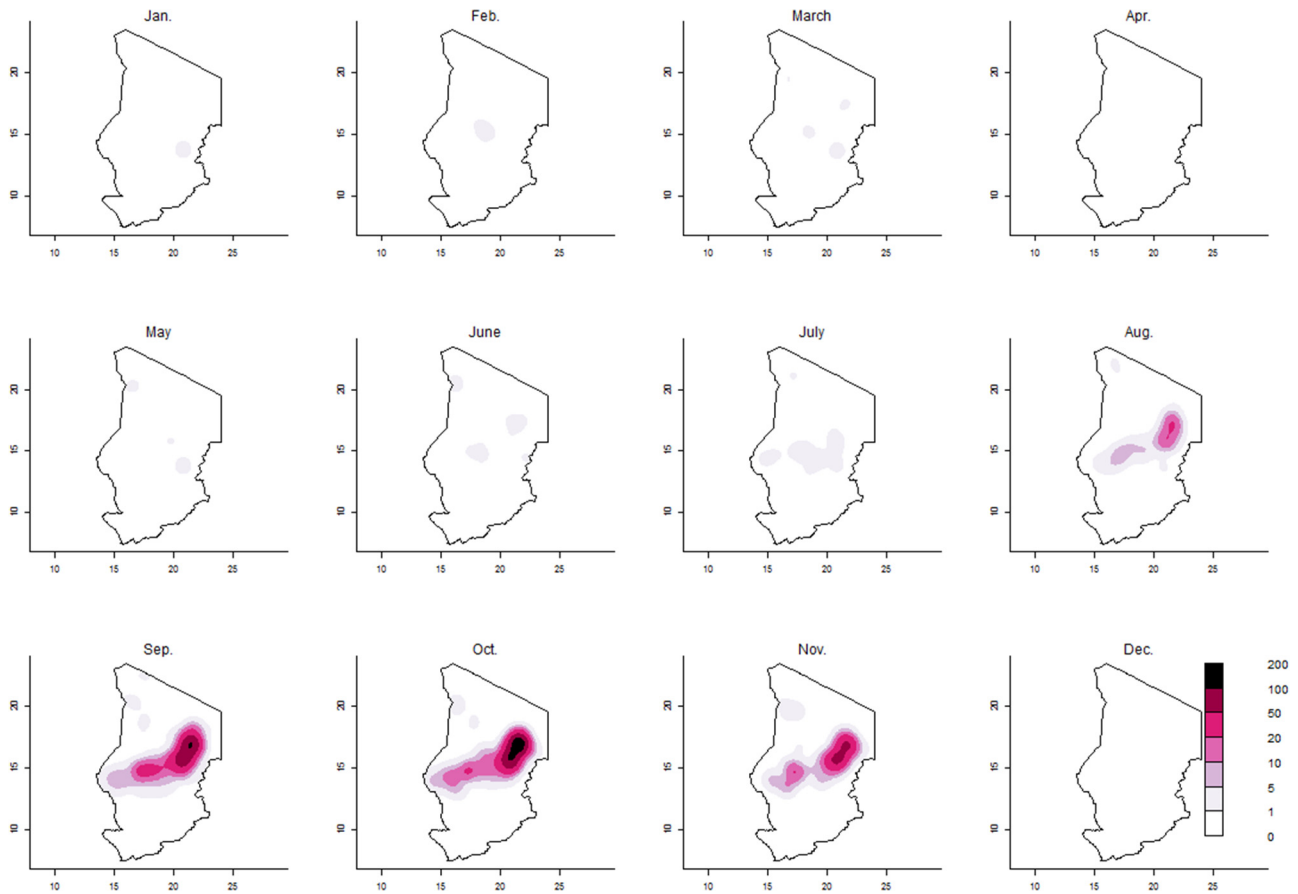


Fig. 3. Densités mensuelles des observations de présence de criquets pèlerins en période de rémission. L'échelle donne le nombre d'observations par degré carré.

Fig. 3. Monthly densities of observations of locusts during remission. The scale gives the number of observations per square degree.

3.2 Cartographie mensuelle en période de rémission

Les observations (Fig. 3) sont rares jusqu'en juin dans le Borkou et sur les bords de l'Ennedi. En juillet, elles s'étendent au 15°N. La zone du Tibesti reste intéressante pour le criquet pèlerin de mai à novembre, avec de faibles densités d'observations des solitaires. D'août à novembre, les observations se concentrent à l'est, sous les piémonts de l'Ennedi. D'importantes observations sont visibles dans la zone du Batha au centre du pays. La zone du lac Tchad est moins affectée en période de rémission qu'en période d'invasion. De janvier à mars, de faibles activités acridiennes sont observées dans le sud et le nord de l'Ennedi. Plus aucun criquet pèlerin n'y est observé d'avril à décembre.

3.3 Cartographie mensuelle en période d'invasion

C'est à partir de mai que sont signalés (Fig. 4) essaims et bandes larvaires, concentrés à l'ouest du pays dans les zones du Kanem/lac Tchad et Hadjer-Lamis jusqu'à 10°N. La zone de Hadjer-Lamis n'est plus affectée ensuite. Dès juin, on observe des infestations dans les zones du Kanem/lac Tchad, de l'est (massif de l'Ennedi) et dans le Borkou. La plus forte concentration

d'observations a lieu en septembre dans trois foyers: le Kanem/lac Tchad à l'ouest, le Bahr El-Ghazal et le Batha au centre et l'Ennedi à l'est. De juillet à novembre, les infestations se généralisent au Kanem/lac Tchad et à l'Ennedi et vers le Borkou. À partir de novembre, on observe une dispersion des populations acridiennes plus au nord et à l'est de la zone de l'Ennedi. En décembre, nous ne relevons plus aucun signalement.

3.4 Cartographie des zones propices à la reproduction

Deux cartes (Fig. 5) illustrent les zones de reproduction au cours des périodes d'invasion/recrudescence et de rémission. La zone la plus importante en termes de densité d'observations de reproductions se situe dans l'Ennedi à l'est du pays, tant en période d'invasion que de rémission. En période d'invasion, les zones du Kanem/lac Tchad sont aussi propices à la reproduction. Les zones du Bahr El-Ghazal et du Batha, au centre du pays, montrent de faibles reproductions en période de rémission. On observe aussi de faibles reproductions dans les régions du Borkou, du Tibesti et du Wadi-Fira à l'est. Ces régions peuvent cependant être propices à la reproduction, surtout en période d'invasion.

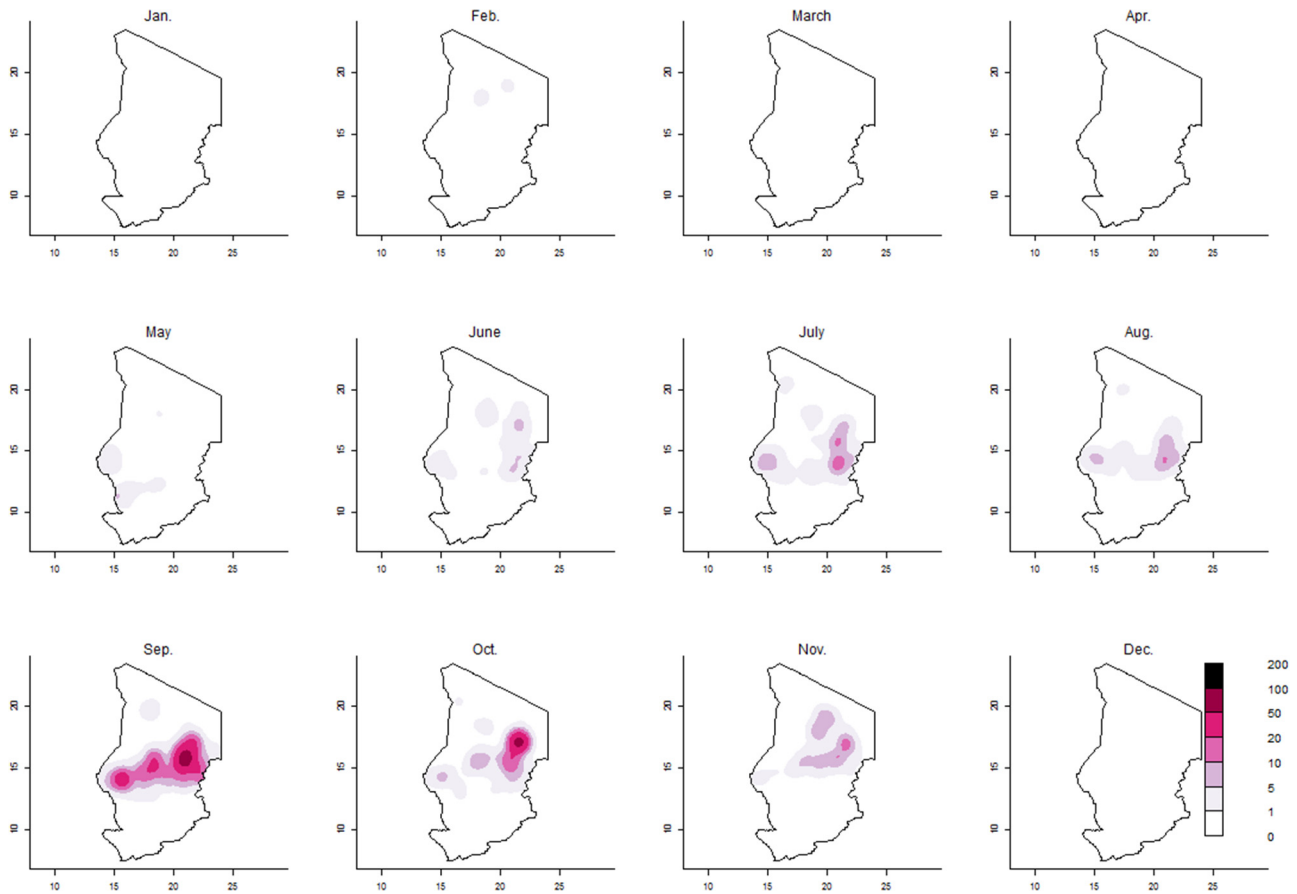


Fig. 4. Densités mensuelles des observations de présence de criquets pèlerins en période d'invasion. L'échelle en bas à droite donne le nombre d'observations par degré carré.

Fig. 4. Monthly densities of observations of locust during invasion. The scale gives the number of observations per square degree.

3.5 Cartographie des habitats propices à la grégarisation

La [figure 6](#) montre une concentration d'observations de signes de grégarisation dans la zone de l'Ennedi et au Batha. La zone du Kanem/lac Tchad présente aussi des signes de grégarisation, en très faible densité. Néanmoins, si on n'utilise pas le critère du seuil de grégarisation en fonction de la végétation issu de l'analyse de [Cissé *et al.* \(2013\)](#), la zone du Kanem/lac Tchad n'apparaît pas comme propice à la grégarisation. L'identification de ces zones vient compléter les zones cartographiées par [Waloff \(1966\)](#) et les données de l'atlas de la FAO ([Popov, 1997](#)) reprises par [Lecoq \(2004\)](#).

4 Discussion

Nos travaux s'inscrivent dans la perspective d'une amélioration du dispositif de lutte préventive. La connaissance approfondie des zones de reproduction et des sites où la transformation phasaire a une forte probabilité de survenir contribue très largement à améliorer le processus opérationnel de prévention ([Magor *et al.*, 2008](#) ; [Sword *et al.*, 2010](#)).

Les recherches sur la localisation et la cartographie des aires grégarigènes ont débuté dès les années 1920 ([Zolotarevsky, 1937](#)). Depuis, des prospections plus ou moins

régulières dans l'ensemble de l'aire d'habitat ont permis de cartographier les biotopes favorables ([Waloff, 1966](#) ; [Magor *et al.*, 2005](#)). La dernière cartographie majeure est celle réalisée par la FAO ([Popov, 1997](#)).

Quatre points nous paraissent essentiels à discuter :

- la cyclicité des dynamiques des populations du criquet pèlerin au Tchad ;
- les zones propices à la reproduction et à la grégarisation et leurs modifications au cours des dernières décennies ;
- les aires grégarigènes et les facteurs influant sur leur fonctionnement ;
- l'application pratique de nos résultats dans la lutte préventive au Tchad.

4.1 Cyclicité des dynamiques de populations du criquet pèlerin

Comprendre la dynamique du criquet pèlerin est essentiel à la mise en œuvre d'une stratégie efficace de gestion préventive des invasions ([Lazar *et al.*, 2016](#) ; [Piou *et al.*, 2017](#)). À cet effet, l'évolution saisonnière de sa distribution doit être analysée à la lumière de l'évolution concomitante des conditions écologiques et tout spécialement des pluies (déterminant les zones favorables à la reproduction) et des vents (permettant les

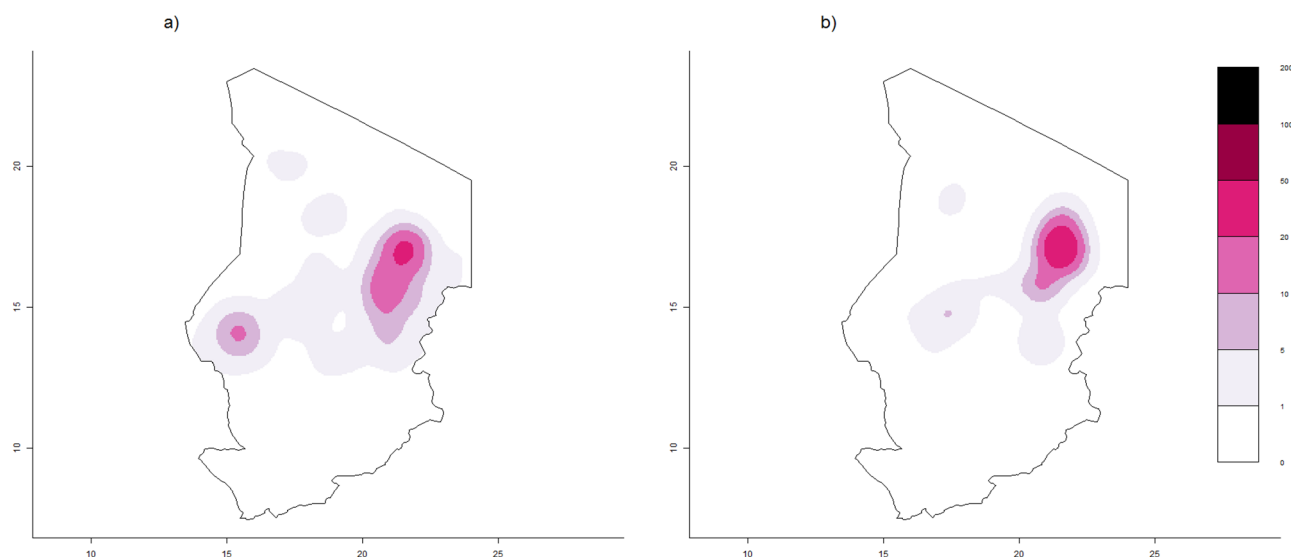


Fig. 5. Densités des observations de critères de reproduction en période : a) d'invasion/recrudescence et b) de rémission. L'échelle donne le nombre d'observations par degré carré.

Fig. 5. Density of observations of reproduction criteria during periods: a) invasion/upsurge and b) remission. The scale gives the number of observations per square degree.

déplacements à la recherche de conditions propices) (Steedman, 1988 ; Symmons et Cressman, 2001).

Le climat du Tchad, désertique au nord, semi-désertique au centre et tropical au sud, dépend des fluctuations en latitude de la zone de convergence intertropicale, aussi appelée front intertropical (FIT). Le mouvement annuel du FIT détermine deux saisons : une saison sèche de décembre à mai et une saison des pluies de juin à novembre. Ce mouvement du FIT et les précipitations associées créent des conditions écologiques (humidité du sol, état de la végétation) qui déterminent la dynamique et les déplacements du criquet pèlerin dans tout le Sahel (Berger, 1991 ; Popov, 1997) ; ils sont aussi, naturellement, à l'origine des dynamiques acridiennes observées au Tchad (Rainey, 1963).

En période de rémission, les signalements sont notés 10 mois sur 12, mais sont rares de janvier à juillet. Le nord du pays (Borkou et Ennedi) et le Tibesti peuvent probablement être favorables à une reproduction hiverno-printanière entre janvier et juin (Duranton et Lecoq, 1990 ; Popov, 1997). Les zones du Kanem/lac Tchad et Bahr El-Ghazal apparaissent aussi favorables au développement du criquet pèlerin. Une limite de l'analyse provient du fait que les zones éloignées, inaccessibles ou dangereuses, sont souvent délaissées par les prospecteurs. En résulte une sous-estimation des surfaces utilisées par le criquet pèlerin. Avec de nouvelles données en période de rémission, cette étude met à jour les anciennes cartes élaborées sur la base de signalements en période d'invasion (Waloff, 1966).

En période d'invasion, les observations montrent que dès mai, les zones du Kanem/lac Tchad et Hadjer-Lamis reçoivent des essaims, puis de juin à août ceux-ci atteignent la vallée du Bahr El-Ghazal et progressivement l'Ennedi, le Borkou et le Tibesti, suivant le mouvement du FIT. Le pic de signalements se situe en septembre. Ensuite, les signalements diminuent progressivement et en octobre, avec le recul vers le sud du FIT, la mousson s'affaiblit et la végétation herbacée commence à se

dessécher. Débute alors la migration des criquets pèlerins vers l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, le plus fréquemment pendant les périodes de vents chauds associées au passage de dépressions traversant la Méditerranée et le Proche-Orient (Steedman, 1990). Là-bas, les criquets pèlerins trouveront des habitats qui leur permettront survie et réalisation d'une reproduction hiverno-printanière (Duranton *et al.*, 1987 ; Rosenberg et Burt, 1999). De décembre à avril, alors que les essaims se trouvent en Afrique du Nord, plus aucun signalement de criquets n'est noté au Tchad où les conditions écologiques (saison sèche) sont trop défavorables. Ces essaims ne reviendront au sud du Sahara qu'à la fin du printemps, en mai, clôturant ainsi le cycle saisonnier (Jeannel, 1948 ; Berger, 1991 ; Popov, 1997).

4.2 Zones propices à la reproduction

Les observations de reproduction en période d'invasion sont majoritairement situées dans deux zones : Kanem et lac Tchad à l'ouest, Ennedi à l'est, comme l'avaient observé Rainey (1963) et Popov (1997). La zone de l'ouest, avec des sols sableux légers, offre au criquet pèlerin des conditions écologiques favorables à la reproduction. La zone de l'est comprend des zones d'épandage, de ruissellement et de récupération des eaux en altitude, qui offrent souvent d'excellents pâturages (Pias, 1960). Ce couvert végétal peut aussi servir de nourriture et de refuge aux populations solitaires (Dogo, 2011). En période de rémission, selon Berger (1991) et Popov (1997), la reproduction peut avoir lieu dans la vallée du Bahr El-Ghazal et dans les zones montagneuses de l'Ennedi et du Ouaddaï. Au Tibesti, la reproduction est peu fréquente mais occasionnellement importante (Popov, 1997). Notre étude confirme ces observations et montre également que la zone du Batha peut abriter des habitats propices à la reproduction en période de rémission. Selon Lorenz (2009), une reproduction s'est produite en octobre 1988 au nord du Tchad et les essaims

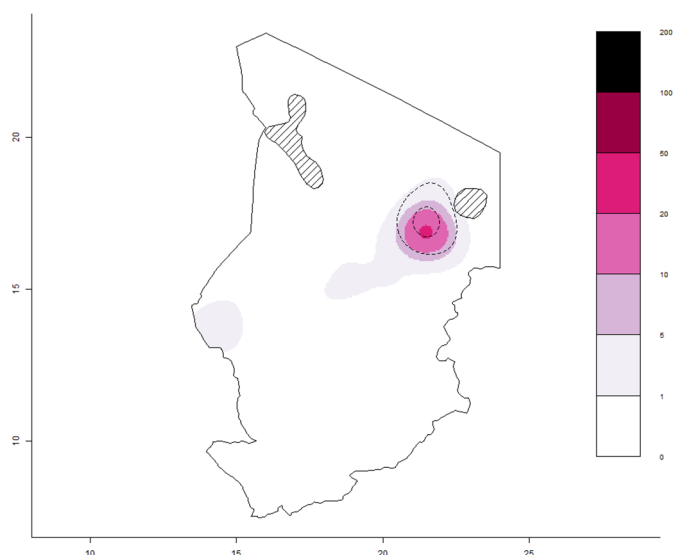


Fig. 6. Densité des observations de critères de grégarisation en période de rémission. Les niveaux de couleur correspondent aux densités d'observation de grégarisation avec 3 critères. L'échelle donne le nombre d'observations par degré carré. Les pointillés délimitent la zone d'observation d'évènements de grégarisation selon 2 critères (sans dépassement du seuil de Cissé *et al.* [2013] à plus d'une observation par degré carré [périmètre extérieur] et 3 observations par degré carré [périmètre intérieur]). Les zones hachurées représentent les aires de grégarisation définies par Lecoq (2004) à partir des données FAO (Popov, 1997).

Fig. 6. Density of observations of gregarization criteria during remission period. The color levels correspond to the densities of gregarization observations with 3 criteria. The scale gives the number of observations per square degree. The dotted lines delimit the observation zone for gregarization events according to 2 criteria (without exceeding the threshold of Cissé *et al.* [2013] to more than one observation per square degree [outer perimeter] and 3 observations per square degree [inner perimeter]). The hatched areas represent the gregarization areas defined by Lecoq (2004) from FAO data (Popov, 1997).

qui en étaient issus se sont déplacés vers la Mauritanie, le Maroc et l'Algérie. Nos observations tendent à le confirmer mais nous ne disposons que de peu d'informations sur les reproductions au Tibesti. Cela peut résulter de deux causes :

- des pluies de moins en moins nombreuses et des habitats de moins en moins propices à la reproduction du criquet pèlerin ;
- des prospections dont le nombre a grandement chuté ces dernières décennies dans cette zone éloignée, peu accessible, voire dangereuse (conflits, présence de mines).

Nos résultats montrent l'importance de la vigilance à porter continuellement aux potentielles aires de reproduction du criquet pèlerin.

4.3 Les aires grégarigènes et les facteurs influant sur leur fonctionnement

Les zones où se produit la transformation phasaire, en milieu désertique ou semi-désertique, ont longtemps été

difficiles à déterminer (Waloff, 1966 ; Berger, 1991 ; Magor *et al.*, 2008). Ces zones restreintes de grégarisation initiale constituent des foyers grégarigènes (Zolotarevsky, 1937), disséminés sur une large partie de l'aire d'habitat. L'addition de ces zones, que l'on peut géographiquement regrouper en plusieurs régions, peut être qualifiée d'aire grégarigène (ou d'aires grégarigènes) : les principales sont situées en Mauritanie, dans les massifs centraux sahariens, sur les bords de la mer Rouge et à la frontière indo-pakistanaise. Les invasions y prennent naissance lorsque les pluies activent une série de zones de reproduction saisonnières, géographiquement séparées, entre lesquelles les criquets se déplacent (Magor *et al.*, 2008). Cependant, la localisation de ces zones peut varier, en particulier sous l'effet de la pluviométrie (Babah Ebbe, 2008). Ces modifications potentielles, considérées dans le cadre des changements climatiques qui s'amorcent, peuvent générer des modifications des habitats du criquet pèlerin (Meynard *et al.*, 2017).

Notre étude montre un glissement des foyers grégarigènes de l'Ennedi par rapport à ceux délimités antérieurement (Lecoq, 2004). De même, la zone du Tibesti citée dans la littérature comme favorable à la grégarisation (Berger, 1991 ; Popov, 1997) n'apparaît pas clairement dans notre analyse. Par contre, sont mises en évidence deux nouvelles zones (Kanem/lac Tchad et Batha), ainsi que l'extension d'une troisième (Ennedi), déjà connue mais auparavant de taille beaucoup plus limitée. Ces trois zones sont, avec le Tibesti, à surveiller régulièrement. De plus amples prospections en période de rémission devraient être menées pour déterminer si ces zones du Kanem/lac Tchad et Batha, anciennement de transit pour les grégaires, ne sont pas devenues propices à la grégarisation du fait des modifications de la pluviométrie. Néanmoins, ces zones n'ont pas la même importance dans nos résultats suivant que deux ou trois critères de grégarisation sont utilisés. La zone du Kanem/lac Tchad apparaît propice à la grégarisation lorsque la densité des solitaires dépassant le seuil de grégarisation est associée à l'état et à la couverture de la végétation en application des critères du modèle de Cissé *et al.* (2013) en fin de saison des pluies. Les seuils de densité permettant la transformation de la phase solitaire aux *transiens* ou grégaires ne constituent pas un outil absolu pour définir un foyer de grégarisation. Des prospections régulières doivent être menées pour confirmer ces observations.

4.4 Implication pratique des résultats

La gestion préventive des invasions consiste à assurer la surveillance du niveau des populations et des conditions écologiques dans les aires de reproduction et de grégarisation par des prospections régulières ainsi que l'utilisation de données météorologiques et satellitaires. La localisation des populations acridiennes en temps réel est essentielle pour mettre en œuvre des stratégies de surveillance et de lutte (Babah Ebbe, 2008). Les cartes statiques présentées dans cette étude ou par Piou *et al.* (2017) doivent permettre une meilleure planification des opérations de surveillance et de lutte préventive. On doit ainsi pouvoir optimiser les itinéraires de surveillance et rendre les interventions précoces plus efficaces (Brader *et al.*, 2006).

Le Batha et l'Ennedi correspondent à des milieux propices à la reproduction et la grégarisation. La zone du Kanem/lac Tchad apparaît comme un nouveau foyer de grégarisation et devrait être considérée à l'avenir dans les programmes de surveillance. Nous y suggérons d'intenses prospections afin de confirmer si la présence de nouveaux foyers de grégarisation permettrait de la qualifier d'aire grégarigène. Toutefois, aucune zone potentiellement favorable à la grégarisation ne devant être délaissée, des prospections extensives devraient être réalisées plus régulièrement au Tibesti et au Borkou, pour confirmer leur rôle dans le processus de reproduction et de grégarisation au Tchad. Ces prospections régulières et plus étendues, couplées à des échantillonnages plus réguliers de la végétation, permettraient aussi d'actualiser les cartes des biotopes du criquet pèlerin afin d'accroître la fiabilité des pronostics à moyen terme. D'une manière plus générale, la technique de lissage spatial utilisée ici pourrait être généralisée à l'ensemble de l'aire de distribution du criquet pèlerin afin d'actualiser la cartographie réalisée par Popov (1997).

Remerciements. Nous sommes très reconnaissants à MM. Keith Cressman et Hichem Dridi qui ont mis à notre disposition les données acridiennes du Tchad sans lesquelles cette étude n'aurait pu être réalisée. Nous remercions la FAO à travers la Commission de lutte contre le criquet pèlerin dans la région occidentale (CLCPRO) ainsi que son secrétaire exécutif, M. Lémène Hamouny, pour avoir financé ce travail.

Références

- Anonyme. 2012. La seconde communication nationale du Tchad sur les changements climatiques. N'Djamena, Tchad: ministère de l'Hydraulique urbaine et rurale, 220 p.
- Babah Ebbe MA. 2008. Biogéographie du criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* Forskål, 1775 : identification, caractérisation, originalité d'un foyer grégarigène en Mauritanie centrale. Thèse de doctorat. Paris: EPHE, 215 p.
- Baddeley A, Rubak E, Turner R. 2016. Spatial point patterns: methodology and applications with R. *Journal of Statistical Software* 75: 8. DOI: [10.18637/jss.v075.b02](https://doi.org/10.18637/jss.v075.b02).
- Berger L. 1991. Environmental concerns in AID programs for locust and grasshopper control in Africa. Ser. 91-7. Washington DC: Office of Technical Resources Bureau for Africa, USAID, 71 p.
- Brader L, Djibo H, Faye FG, Ghaout S, Lazar M, Luzietoso PN, *et al.* 2006. Apporter une réponse plus efficace aux problèmes posés par les criquets pèlerins et à leurs conséquences sur la sécurité alimentaire, les moyens d'existence et la pauvreté. Évaluation multilatérale de la campagne 2003-05 contre le criquet pèlerin. Rome: FAO, 96 p. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/43fc3a71-3323-4230-9a27-21bf2c2b5600/>.
- Cissé S, Ghaout S, Mazih A, Babah Ebbe MA, Benahi AS, Piou C. 2013. Effect of vegetation on density thresholds of adult desert locust gregarization from survey data in Mauritania. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 149: 159-165. DOI: [10.1111/eea.12121](https://doi.org/10.1111/eea.12121).
- Collett M, Despland E, Simpson SJ, Krakauer D. 1998. Spatial scales of desert locust gregarization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95: 13052-13055. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.22.13052>.
- Cressman K. 2001. Desert locust guidelines: survey. Rome: FAO, 56 p.
- Cressman K. 2008. The use of new technologies in desert locust early warning. *Outlooks on Pest Management* 19: 55-59. DOI: [10.1564/19apr03](https://doi.org/10.1564/19apr03).
- Dogo I. 2011. Étude biogéographique des zones potentielles de grégarisation du criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria* Forsk. 1775) au Niger sur la base des données d'archives des prospections acridiennes de 1965 à 2007. Thèse. Agadir, Maroc: Univ. Ibn Zohr, 157 p.
- Dogo I, Idrissi Hassani ML, Bouaïchi A, Yayah G, Alfhari I. 2011. Relationships between the occurrence of desert locust (*Schistocerca gregaria* Forsk.) and plant communities in Niger from 1965 to 2007. *International Research Journal of Plant Science* 2: 2141-2447.
- Duranton JF, Launois M, Launois-Luong MH, Lecoq M, Rachadi T. 1987. Guide antiacridien du Sahel. Paris / Montpellier (France): ministère de la Coopération / CIRAD-GERDAT-Prifas, 343 p.
- Duranton JF, Lecoq M. 1990. Le Criquet pèlerin au Sahel. Niamey, Niger: CILSS-DFPV, coll. «Acridologie opérationnelle n°6», 84 p. http://locust.cirad.fr/ouvrages_pratiques/pdf/DFPV6.pdf.
- Jeannel R. 1948. La lutte biologique contre les sauterelles. *Acta Botanica Gallica* 4: 1-18. DOI: [10.5169/seals-310171](https://doi.org/10.5169/seals-310171).
- Keita MN. 2009. Contribution à l'amélioration de la lutte préventive par l'étude de la biogéographie le Criquet pèlerin au Mali. Mémoire en acridologie. Agadir (Maroc): IAV Hassan II, 106 p.
- Latchinsky AV. 2010. Locusts. In: Breed MD, Moore J, eds. *Encyclopedia of animal behavior* 2. USA: Academic Press, pp. 288-297. DOI: [10.1111/1.JRS.7.075099](https://doi.org/10.1111/1.JRS.7.075099).
- Latchinsky AV, Piou C, Franc A, Soti V. 2016. Applications of remote sensing to locust management. In: Baghdadi N, Zribi M, eds. *Land surface remote sensing: environment and risks*. ISTE, pp. 263-294. DOI: [10.1016/B978-1-78548-105-5.50008-6](https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-105-5.50008-6).
- Lazar M, Piou C, Doumandji-Mitiche B, Lecoq M. 2016. Importance of solitary desert locust population dynamics: lessons from historical survey data in Algeria. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 161: 168-180. DOI: [10.1111/eea.12505](https://doi.org/10.1111/eea.12505).
- Lecoq M. 1991. Le criquet pèlerin : enseignements de la dernière invasion et perspectives offertes par la biomodélisation. In: Essaid A, ed. La lutte antiacridienne. Paris: AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, p. 71-98. <http://agritrop.cirad.fr/348844>.
- Lecoq M. 2004. Vers une solution durable au problème du criquet pèlerin ? *Sécheresse* 15: 217-224.
- Lorenz MW. 2009. Migration and trans-Atlantic flight of locusts. *Quaternary International* 196: 4-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2007.09.038>.
- Magor JI, Ceccato P, Dobson HM, Pender J, Ritchie L. 2005. Preparedness to prevent desert locust plagues in the Central region, an historical review. Report AGP/DL/DS/35. Desert locust technical series. Rome: FAO, 129 p. <http://www.fao.org/ag/locusts/en/publicat/docs/tech/1288/index.html>.
- Magor JI, Lecoq M, Hunter DM. 2008. Preventive control and desert locust plagues. *Crop Protection* 27: 1527-1533. DOI: [10.1016/j.cropro.2008.08.006](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.08.006).
- Meynard CN, Gay PE, Lecoq M, Foucart A, Piou C, Chapuis MP. 2017. Climate-driven geographic distribution of the desert locust during recession periods: subspecies niche differentiation and relative risks under scenarios of climate change. *Global Change Biology* 23(11): 4739-4749. DOI: [10.1111/gcb.13739](https://doi.org/10.1111/gcb.13739).
- Pener MP, Simpson SJ. 2009. Locust phase polyphenism: an update. *Advances in Insect Physiology* 36, 1-286. DOI: [10.1016/S0065-2806\(08\)36001-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2806(08)36001-9).
- Pias J. 1960. Sols de la région est du Tchad: plaines de piedmont, massifs du Ouaddaï et de l'Ennedi. Fort-Lamy: ORSTOM et Centre de recherches tchadiennes, Commission scientifique du Logone-Tchad. [2019/06/15]. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:12866>.
- Piou C, Jaavar Bacar M, Babah Ebbe MAO, Chihane J, Ghaout S, Cissé S, *et al.* 2017. Mapping the spatiotemporal distributions of

- the desert locust in Mauritania and Morocco to improve preventive management. *Basic and Applied Ecology* 25: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2017.10.002>.
- Piou C, Gay PE, Benahi AS, Babah Ebbe MA, Chihrane J, Ghaout S, *et al.* 2019. Soil moisture from remote sensing to forecast desert locust presence. *Journal of Applied Ecology* 46: 966–975. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13323>.
- Popov GB. 1997. Atlas des aires de reproduction du criquet pèlerin. Rome: FAO, 147 p.
- Popov GB, Duranton JF, Gigault J. 1991. Étude écologique des biotopes du criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* (Forskål, 1775) en Afrique Nord-Occidentale : mise en évidence et description des unités territoriales écologiquement homogènes. Montpellier, France: CIRAD-PRIFAS, 744 p.
- R Development Core Team. 2008. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. [2019/06/15]. <http://www.r-project.org>.
- Rainey RC. 1963. Meteorology and the migration of desert locusts: application of synoptic meteorology in locust control. *Anti-Locust Memoirs* 7: 1–115.
- Rosenberg J, Burt PJA. 1999. Windborne displacements of desert locusts from Africa to the Caribbean and South America. *Aerobiologia* 15: 165–175. DOI: [10.1023/A:1007529617032](https://doi.org/10.1023/A:1007529617032).
- Simpson SJ, Sword GA, Lo N. 2011. Polyphenism in insects. *Current Biology* 21: 738–749. DOI: [10.1016/j.cub.2011.06.006](https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.06.006).
- Steedman A. 1990. Locust handbook. Chatam, UK: Natural Resources Institute, 180 p.
- Steedman A. 1988. Locust handbook. Chatam Maritime: Overseas Development of Natural Ressources Institue (ODNRI), p. 180.
- Sword GA, Lecoq M, Simpson SJ. 2010. Phase polyphenism and preventative locust management. *Journal of Insect Physiology* 56: 949–957. DOI: [10.1016/j.jinsphys.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2010.05.005).
- Symmons PM, Cressman K. 2001. Directives sur le criquet pèlerin 1. Biologie et comportement. Rome: FAO, 25 p.
- Waloff Z. 1966. The upsurges and recessions of the desert locust plagues: an historical survey. *Anti-Locust Memoirs* 8: 1–111.
- Weidmann NB, Gleditsch KS. 2016. The CShapes Dataset and Utilities. R package version 0.6. [2019/06/15]. <http://nils.weidmann.ws/projects/cshapes>.
- Zolotarevsky BN. 1937. Étude de la phase solitaire des acridiens dans les aires et foyers grégaires. Compte rendu de la quatrième Conférence internationale pour les recherches antiacridiennes, Le Caire, 24 p.
- Zhang L, Lecoq M, Latchininsky A, Hunter DM. 2019. Locust and grasshopper management. *Annual Review of Entomology* 64: 15–34. DOI: [10.1146/annurev-ento-011118-112500](https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011118-112500).

Citation de l'article : Kayalto M, Idrissi Hassani M, Lecoq M, Gay P-E, Piou C. 2020. Cartographie des zones de reproduction et de grégarisation du criquet pèlerin au Tchad. *Cah. Agric.* 29: 14.